

発明の名称

蛍光性ガラス、光増幅用導波路および光増幅モジュール

技術分野

【0001】 本発明は、蛍光性を有する蛍光性ガラス、この蛍光性ガラスからなる光増幅用導波路、および、この光増幅用導波路を含む光増幅モジュールに関するものである。

関連技術

【0002】 光通信システム等において用いられる光増幅モジュールは、信号光が光伝送路を伝搬する間に被った損失を補償するものであり、光増幅媒体である光増幅用ファイバに励起光を供給することにより、その光増幅用ファイバにおいて信号光を光増幅することができる。例えば、 $E_{r}$ 元素が添加された光増幅用ファイバを含む光増幅モジュール（E DFA: Erbium Doped Fiber Amplifier）は、波長0.98μm帯または1.48μm帯の励起光を用いて、Cバンド（1530nm～1565nm）またはLバンド（1565nm～1625nm）の信号光を光増幅することができる。また、 $T_m$ 元素が添加された光増幅用ファイバを含む光増幅モジュール（T DFA: Thulium Doped Fiber Amplifier）は、波長0.8μm帯、1.05μm帯、1.2μm帯、1.4μm帯または1.55～1.65μm帯の励起光を用いて、Sバンド（1460nm～1530nm）の信号光を光増幅することができる。

【0003】 ところで、 $Al_2O_3$  (3.7重量%),  $SiO_2$  (94.0重量%) および $Bi_2O_3$  (2.2重量%) からなる組成の蛍光性ガラスが藤本靖, 他, 「1.3μm帯におけるBiドープシリカガラスの新しい発光特性」, 電子情報通信学会論文誌C, Vol. J83-C, No. 4, pp. 354-355 (2000年4月)に記載されている。この $Bi_2O_3$ を含む組成の蛍光性ガラスの蛍光スペクトルは、波長1.24μm付近に蛍光ピーク波長を有する広帯域のものとなっている。一方、この蛍光性ガラスは、波長域900nm～1600nmの範囲では吸収スペクトルが観測されていない。

したがって、この蛍光性ガラスからなる光増幅用ファイバを用いて光増幅モジュールを構成すれば、標準的なシングルモード光ファイバの零分散波長である波長1. 3  $\mu$ mを含む帯域で、信号光を光増幅することができるものと期待される。

【0004】 しかしながら、上記非特許文献1に記載された蛍光性ガラスの蛍光性ピークは波長1. 3  $\mu$ mより短波長側にずれた波長1. 24  $\mu$ m付近に存在するので、この蛍光性ガラスからなる光増幅用ファイバを用いた光増幅モジュールは、励起光から信号光へのパワー変換の効率は必ずしも良くないと考えられる。

【0005】 また、EDFAの場合、実使用時の利得スペクトルは蛍光スペクトルから吸収スペクトルを反転分布に応じて差し引いたものとなるので、蛍光ピーク波長1. 53  $\mu$ mが必ずしも利得ピーク波長では無く、寧ろ、蛍光ピーク波長より長波長側の波長1. 55  $\mu$ m～1. 56  $\mu$ m付近で利得ピークが存在する。

EDFAの場合、利得スペクトル形状は反転分布により決定されるので、励起光および入力信号光それぞれのパワーを調整することにより、例えば反転分布を40%と調整すれば、利得スペクトルの平坦性を実現することができる。これに対して、非特許文献1に記載された蛍光性ガラスは、蛍光が見られても吸収が見られないで、利得スペクトルの形状は蛍光スペクトルの形状と同一であると考えられる。したがって、この蛍光性ガラスからなる光増幅用ファイバを用いた光増幅モジュールの利得スペクトルは、励起光および信号光それぞれのパワーならびに光増幅用ファイバの濃度条長積を如何に調整しようとも、平坦性が悪いと考えられる。

【0006】 また、非特許文献1に記載された蛍光性ガラスは、融点が高く、温度1760℃に加熱して製造されるので、製造設備が大規模になり、必ずしも製造が容易でない。

【0007】 本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、平坦な利得スペクトルを実現することができ光増幅効率が優れ製造が容易な蛍光性ガラス、光増幅用導波路および光増幅モジュールを提供することを目的とする。

発明の要旨

**【0008】** 本発明に係る蛍光性ガラスは、添加物としてBiイオンを含有する領域のガラス構成成分としてSiO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub>およびP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>のうち少なくとも1種類の酸化物を50mol%以上含むことを特徴とする。このような蛍光性ガラスは、蛍光性を有し、また、融点が低いことから製造が容易である。

**【0009】** 本発明に係る蛍光性ガラスは、ガラス構成成分としてBaO, CaO, Na<sub>2</sub>O, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>およびNb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>のうち少なくとも1種類の酸化物を含むのが好適であり、この場合には、組成に応じた蛍光特性を実現することができる。

**【0010】** 本発明に係る蛍光性ガラスは、共添加物として3価の正イオンとなる元素（例えば、Al, La, 等）の酸化物を含有するのが好適であり、この場合には、Biイオンのクラスターリングを防止することができ、蛍光強度を高めることができる。共添加物としてAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含有するのが好適であり、また、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の濃度が5mol%以上であるのが好適である。

**【0011】** 本発明に係る蛍光性ガラスは、共添加物としてAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含有すること無くB<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含有するのが好適であり、この場合には、光ファイバの損失が低い波長1.41μm帯に蛍光ピークを実現することができる。さらに共添加物としてTa<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を含有するのが好適であり、この場合には、より光通信に適した波長1.32μm帯に蛍光ピークを有することができる。

**【0012】** 本発明に係る蛍光性ガラスは、蛍光のピーク波長が1300nmを超えるのが好適であり、この場合には、この蛍光性ガラスからなる光導波路（例えば光ファイバ）は、光通信システムで用いられる信号光を光増幅することができる。また、蛍光のピーク波長が1400nmを超えるのが更に好適であり、この場合には、この蛍光性ガラスからなる光導波路（例えば光ファイバ）は、光通信システムにおいて低損失で伝搬する信号光を光増幅することができる。

**【0013】** 本発明に係る蛍光性ガラスは、塩基度の指標であるB値が0.3

以下であるのが好適であり、この場合には、蛍光強度を高めることができる。また、共添加物として3価の正イオンとなる元素の酸化物を含有するのが好適であり、この場合には、Biイオンのクラスタリングを防止することができ、蛍光強度を高めることができる。

5 【0014】 本発明に係る蛍光性結晶は、添加物としてBiイオンを含有する領域にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>以外の共添加物を含有することを特徴とする。また、本発明に係る蛍光性ガラスセラミックスは、添加物としてBiイオンを含有する領域にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>以外の共添加物を含有することを特徴とする。これら蛍光性結晶および蛍光性ガラスセラミックスそれぞれは、上記の蛍光性ガラスより強い蛍光を得ること10 ができる。

【0015】 本発明に係る光増幅用導波路は、上記の本発明に係る蛍光性ガラスからなり、励起光および信号光を導波し得るとともに、励起光が供給されることにより信号光を光増幅し得ることを特徴とする。また、本発明に係る光増幅モジュールは、上記の本発明に係る光増幅用導波路と、増幅用導波路に励起光を供給する励起光供給手段とを備えることを特徴とする。この光増幅用モジュールでは、光増幅媒体としての光増幅用導波路が上記の本発明に係る蛍光性ガラスからなり、この光増幅用導波路に励起光供給手段により励起光が供給され、この光増幅用導波路において信号光が光増幅される。したがって、この光増幅モジュールは、従来では利得が得られなかった波長域で利得を有することができる。また、20 励起光の中心波長が800nmより長いのが好適であり、この場合には、蛍光ピーク波長を1.3μmより長くすることができる。

【0016】 本発明に係る光増幅モジュールは、(1) 上記の本発明に係る光増幅用導波路であつて互いに組成が異なり信号光伝搬経路上に縦続接続された第1光増幅用導波路および第2光増幅用導波路と、(2) 第1光増幅用導波路に励起光を供給する第1励起光供給手段と、(3) 第2光増幅用導波路に励起光を供給する第2励起光供給手段とを備えることを特徴とする。また、第1光増幅用導波路が25

A<sub>1</sub>O<sub>3</sub>を含有し、第1光增幅用導波路がA<sub>1</sub>O<sub>3</sub>以外の共添加物を含有し、第1光增幅用導波路および第2光增幅用導波路それぞれの蛍光ピーク波長が互いに70nm以上離れているのが好適である。この光增幅モジュールでは、信号光は、信号光伝搬経路上に継続接続された第1光增幅用導波路および第2光增幅用導波路それぞれにおいて光増幅される。第1光增幅用導波路および第2光增幅用導波路は、上記の本発明に係る光增幅用導波路であって、互いに組成が異なるから、この光增幅モジュールは、広帯域で利得を有することができる。

【0017】 本発明に係る光增幅モジュールは、(1) 上記の本発明に係る光增幅用導波路であって互いに組成が異なる第1光增幅用導波路および第2光增幅用導波路と、(2) 第1光增幅用導波路に励起光を供給する第1励起光供給手段と、(3) 第2光增幅用導波路に励起光を供給する第2励起光供給手段と、(4) 入力した信号光を第1波長域と第2波長域とに分波して、第1波長域の信号光を第1光增幅用導波路へ出力し、第2波長域の信号光を第2光增幅用導波路へ出力する光分波手段と、(5) 第1光增幅用導波路により光増幅されて出力された第1波長域の信号光と、第2光增幅用導波路により光増幅されて出力された第1波長域の信号光とを入力して、これらを合波して出力する光合波手段とを備えることを特徴とする。この光增幅モジュールでは、入力した信号光は、光分波手段により第1波長域と第2波長域とに分波される。光分波手段と光合波手段との間に第1光增幅用導波路と第2光增幅用導波路とが並列接続されていて、第1波長域の信号光は第1光增幅用導波路により光増幅され、第2波長域の信号光は第2光增幅用導波路により光増幅されて、そして、光増幅された第1波長域および第2波長域それぞれの信号光は光合波手段により合波されて出力される。第1光增幅用導波路および第2光增幅用導波路は、上記の本発明に係る光增幅用導波路であって、互いに組成が異なるから、この光增幅モジュールは、広帯域で利得を有することができる。

#### 図面の簡単な説明

【0018】 図1は、本実施形態に係る蛍光性ガラスの蛍光特性を示すグラフである。

【0019】 図2は、他の実施形態に係る蛍光性ガラスの蛍光特性を示すグラフである。

5 【0020】 図3は、更に他の実施形態に係る蛍光性ガラスの蛍光特性を示すグラフである。

【0021】 図4は、代表的な酸化物のB値を纏めた図表である。

【0022】 図5は、蛍光性ガラスJ, Kそれぞれの蛍光特性を示すグラフである。

10 【0023】 図6は、蛍光性ガラスA～IそれぞれのB値を纏めた図表である。

【0024】 図7は、本発明に従う第1実施形態に係る光増幅モジュール1の構成図である。

【0025】 図8A及び図8Bは、本発明に従う第1実施形態に係る光増幅モジュール1の利得スペクトルを示す図である。

15 【0026】 図9は、本発明に従う第2実施形態に係る光増幅モジュール2の構成図である。

【0027】 図10は、本発明に従う第3実施形態に係る光増幅モジュール3の構成図である。

#### 発明を実施するための最良の形態

20 【0028】 以下、添付図面を参照して、本発明を実施するための最良の形態を詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

25 【0029】 本実施形態に係る蛍光性ガラスは、添加物としてBiイオンを含有する領域のガラス構成成分としてSiO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub>およびP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>のうち少なくとも1種類の酸化物を50mol%以上含むものである。また、ガラス構成成分としてBaO, CaO, Na<sub>2</sub>O, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>およびNb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>のう

ち少なくとも 1 種類の酸化物を含むのが好適である。共添加物として 3 値の正イオンとなる元素の酸化物を含有するのが好適であり、その中でも共添加物として  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を含有するのが好適であり、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  の濃度が 5 mol% 以上であるのが好適である。或いは、共添加物として、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  を含有すること無く、 $\text{B}_2\text{O}_3$  を含有するのが好適であり、さらに  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  を含有するのが好適である。また、蛍光のピーク波長が 1300 nm を超えるのが好適であり、蛍光のピーク波長が 1400 nm を超えるのが更に好適である。さらに、塩基度の指標である B 値が 0.3 以下であるのが好適であり、共添加物として 3 値の正イオンとなる元素の酸化物を含有するのが好適である。

【0030】 図 1 は、本実施形態に係る蛍光性ガラスの蛍光特性を示すグラフである。この図には、4 種類の蛍光性ガラス A～D それぞれの蛍光特性が示されている。蛍光性ガラス A の組成は、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2.2mol%),  $\text{SiO}_2$  (97.5mol%) および  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (0.3mol%) からなる。蛍光性ガラス B の組成は、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  (2.5mol%),  $\text{B}_2\text{O}_3$  (5mol%),  $\text{SiO}_2$  (92.5mol%) および  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (0.3mol%) からなる。蛍光性ガラス C の組成は、 $\text{GeO}_2$  (2.5mol%),  $\text{B}_2\text{O}_3$  (5mol%),  $\text{SiO}_2$  (92.5mol%) および  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (0.3mol%) からなる。また、蛍光性ガラス D の組成は、 $\text{Na}_2\text{O}$  (5mol%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5mol%),  $\text{GeO}_2$  (90mol%) および  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (0.8mol%) からなる。なお、蛍光性ガラス B～D それぞれについては、マトリックス組成に対して  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  が幾ら添加するかという観点で組成が表現されている。Ti サファイアレーザ光源から出力される波長 800 nm のレーザ光が励起光として用いられた。

【0031】 この図から判るように、蛍光性ガラス A は、波長 1.24 μm 附近に蛍光ピークを有している。これに対して、蛍光性ガラス B および D それは、波長 1.32 μm 附近に蛍光ピークを有していることから、O バンド (1260 nm～1360 nm) の信号光を光増幅するのに適している。また、蛍光性ガラス C は、波長 1.41 μm 附近に蛍光ピークを有していることから、E バン

ド（1360 nm～1460 nm）の信号光を光増幅するのに適している。

**【0032】** なお、上記の蛍光性ガラスA～DそれぞれのホストガラスがSiO<sub>2</sub>であったが、ホストガラスがGeO<sub>2</sub>またはP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>である場合にも、図1に示されたのの同様の蛍光特性が得られる。SiO<sub>2</sub>ホストガラスの融点が150  
5 0°C～1600°Cであるのに対して、GeO<sub>2</sub>ホストガラスおよびP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>ホストガラスそれは、融点が1350°C～1400°Cであるので、坩堝法などの比較的簡便な設備で製造することができるという利点を有する。

**【0033】** 図2は、他の実施形態に係る蛍光性ガラスの蛍光特性を示すグラフである。この図には、3種類の蛍光性ガラスE～Gそれぞれの蛍光特性が示されている。蛍光性ガラスE～Gそれは、ホストガラスがGeO<sub>2</sub>である。蛍光性ガラスEの組成は、BaO (5mol%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5mol%), GeO<sub>2</sub> (90mol%) およびBi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.8mol%) からなる。蛍光性ガラスFの組成は、CaO (5mol%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5mol%), GeO<sub>2</sub> (90mol%) およびBi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.8mol%) からなる。また、蛍光性ガラスGの組成は、Na<sub>2</sub>O (5mol%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5mol%), GeO<sub>2</sub> (90mol%) およびBi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.8mol%) からなる。ここでも、マトリックス組成に対してBi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が幾ら添加するかという観点で組成が表現されている。Tiサファイアレーザ光源から出力される波長800 nmのレーザ光が励起光として用いられた。

**【0034】** なお、Bi添加の蛍光性ガラスの吸収スペクトルは波長500 nmおよび700 nmそれぞれに顕著なピークを有しているので、800 nmという励起光波長は寧ろ長すぎる。しかし、これより短い波長の励起光で蛍光性ガラスを励起すると、蛍光ピークは波長1.26 μm帯より短波長側にシフトしてしまう。したがって、吸収効率は悪いものの、波長800 nmまたはこれ以上の波長の励起光で、Bi添加の蛍光性ガラスを励起するのが好適である。

**【0035】** 図3は、更に他の実施形態に係る蛍光性ガラスの蛍光特性を示すグラフである。この図には、2種類の蛍光性ガラスHおよびIそれぞれの蛍光特

性が示されている。蛍光性ガラスHおよびIそれぞれは、ホストガラスがP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>である。蛍光性ガラスHの組成は、BaO (50mol%), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (50mol%) およびBi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.8mol%) からなる。また、蛍光性ガラスIの組成は、BaO (30mol%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10mol%), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (60mol%) およびBi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.8mol%) からなる。  
5 ここでも、マトリックス組成に対してBi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が幾ら添加するかという観点で組成が表現されている。Tiサファイアレーザ光源から出力される波長800 nmのレーザ光が励起光として用いられた。

【0036】 図2および図3から判るように、蛍光性ガラスEは、蛍光性ガラスAの蛍光ピーク波長より幾らか長波長側の波長1.26 μm付近に蛍光ピークを有する。また、蛍光性ガラスIは、蛍光性ガラスAの蛍光ピーク波長より幾らか長波長側の波長1.25 μm付近に蛍光ピークを有する。ホストガラスがGeO<sub>2</sub>である場合には、添加物としてBaOが含まれているのが好適である。また、ホストガラスがP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>である場合には、添加物としてBaOが含まれているのが好適であるが、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が更に含まれていれば、蛍光の増強に一層効果的である。  
10  
15

【0037】 蛍光性ガラスHと比較して蛍光性ガラスIの蛍光強度が大きい理由の1つは、添加されたAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>がBiイオンのクラスタリングを防止して、このことが蛍光強度を高めることに貢献したものと考えられる。同様の効果は、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>だけでなく、Biと同じ3価の正イオンとなる元素（例えばLa等）の酸化物を共添加した場合にも得られると考えられる。また、これらの酸化物の共添加濃度は、高いことが望ましく、後述する図5に示す蛍光性ガラスJの如く5 mol%以上であるのが好適である。  
20  
25

【0038】 Biイオンの蛍光発生機構を考えると、酸素配位数の変化により蛍光が発生していると推定される。これが発生し易いのは、Biイオンの酸素配位数が12と高い状態にあるときであり、この状態を実現するにはガラスの酸素供給能力を下げればよい。また、この為の指標として、酸化物ガラスの塩基度を表すパラメータであるB値が用いられる。

【0039】 B値は、以下のように定義される。ガラス構成成分*i*のクーロン力に因る正イオンと酸素イオンとの間の結合力をあらわすパラメータA<sub>*i*</sub>は、下記の式で表される。ここで、Z<sub>*i*</sub>は正イオンの原子価であり、r<sub>*i*</sub>は正イオンの半径である。数値2は酸素イオンの原子価であり、数値1.40は酸素イオンの半径である。

5

【0040】 数1：

$$A_i = \frac{Z_i \times 2}{(r_i + 1.40)^2} \quad \cdots (1)$$

このA<sub>*i*</sub>の逆数であるB<sub>*i*'</sub>は、ガラス系におけるガラス構成成分*i*の酸素イオンの活量（塩基度）を表す。

10

【0041】 数2：

$$B_i' = \frac{1}{A_i} \quad \cdots (2)$$

15

【0042】 さらに、このB<sub>*i*'</sub>を規格化したパラメータB<sub>*i*</sub>は以下の式で表される。ここで、B'<sub>SiO<sub>2</sub></sub>はSiO<sub>2</sub>成分のB<sub>*i*'</sub>値であり、B'<sub>CaO</sub>はCaO成分のB<sub>*i*'</sub>値である。この規格化されたB<sub>*i*</sub>は、SiO<sub>2</sub>成分に対しては値が0であり、CaO成分に対しては値が1である。

【0043】 数3：

$$B_i = \frac{B_i' - B_{SiO_2}'}{B_{CaO}' - B_{SiO_2}'} = \frac{B_i' - 0.405}{1.023} \quad \cdots (3)$$

多成分ガラスの場合、パラメータBは以下の式で表される。ここで、n<sub>*i*</sub>は、ガラス構成成分*i*の正イオンの割合である。

20

【0044】 数4：

$$B = \sum_i n_i B_i \quad \cdots (4)$$

【0045】 図4は、代表的な酸化物のB値を纏めた図表である。例えば、以

下のような蛍光性ガラス J および蛍光性ガラス K を考える。蛍光性ガラス J の組成は、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5mol%),  $\text{B}_2\text{O}_3$  (15mol%),  $\text{SiO}_2$  (80mol%) および  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (0.8mol%) からなる。蛍光性ガラス K の組成は、 $\text{Na}_2\text{O}$  (40mol%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (5mol%),  $\text{SiO}_2$  (55mol%) および  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (0.8mol%) からなる。蛍光性ガラス J および蛍光性ガラス K それぞれの Al 濃度は互いに等しい。しかし、図 4 に示された各酸化物の B 値および上記(4)式に基づいて計算すると、蛍光性ガラス J の B 値は 0.03 であり、蛍光性ガラス K の B 値は 1.31 である。

**【0046】** 図 5 は、蛍光性ガラス J, K それぞれの蛍光特性を示すグラフである。なお、蛍光性ガラス K の蛍光特性は、何らかの発光を観測することができるまで測定レンジが拡大されて測定された。B 値が小さい蛍光性ガラス J では、図 1～図 3 に示されたものと同様に顕著な蛍光が見られた。これに対して、B 値が大きい蛍光性ガラス K では、測定レンジを拡大しても観測されたのは雑音成分のみであった。

**【0047】** 図 6 は、蛍光性ガラス A～I それぞれの B 値を纏めた図表である。蛍光性ガラス A～I それぞれの B 値は、図 4 に示された各酸化物の B 値および上記(4)式に基づいて求められた。図 2 中の蛍光強度が小さい蛍光性ガラス G の B 値は 0.30 であり、図 3 中の蛍光強度が小さい蛍光性ガラス H の B 値は 0.41 であり、他の蛍光性ガラスと比較すると、蛍光性ガラス G, H の B 値は大きい。蛍光性ガラス G と比較して蛍光性ガラス E, F の蛍光強度は数倍大きいが、これは、蛍光性ガラス E, F の B 値が小さいことに因る効果であると考えられる。また、蛍光性ガラス H と比較して蛍光性ガラス I の蛍光強度は数倍大きいが、これは、蛍光性ガラス I の B 値が小さいこと、および、蛍光性ガラス I に Al が添加されていること、の双方に因る効果であると考えられる。

**【0048】** 以上から、 $\text{Bi}$  イオンの蛍光を得るには、少なくとも B 値を 0.3 以下に保ち、更に Al 等の 3 価の正イオンとなる元素の酸化物を共添加することが望ましい。

【0049】 次に、本実施形態に係る光増幅モジュールについて説明する。本実施形態に係る光増幅モジュールは、上述した本実施形態に係る蛍光性ガラスからなる光増幅用ファイバ（光増幅用導波路）を用いるものである。

【0050】 図7は、第1実施形態に係る光増幅モジュール1の構成図である。

この図に示される光増幅モジュール1は、光入力端101に入力した信号光を光増幅して光出力端102より出力するものである。光増幅モジュール1は、光入力端101から光出力端102へ向かう信号光伝搬経路上に順に、光カプラ111、光アイソレータ121、光カプラ112、光増幅用ファイバ131、利得等化器140、光増幅用ファイバ132、光カプラ113、光アイソレータ122および光カプラ114を備える。また、光増幅モジュール1は、光カプラ111に接続されたフォトダイオード151、光カプラ112に接続されたレーザダイオード162、光カプラ113に接続されたレーザダイオード163、および、光カプラ114に接続されたフォトダイオード154を備える。

【0051】 光増幅用ファイバ131、132それぞれは、上述した何れかの蛍光性ガラスからなり、励起光および信号光を導波し得るとともに、励起光が供給されることにより信号光を光増幅し得る。また、光増幅用ファイバ131、132は、互いに組成が異なり、信号光伝搬経路上に光学的に継続接続されている。光アイソレータ121、122それぞれは、光入力端101から光出力端102へ向かう順方向に光を通過させるが、逆方向には光を通過させない。光カプラ112およびレーザダイオード162は、光増幅用ファイバ131に励起光を供給する励起光供給手段を構成している。光カプラ113およびレーザダイオード163は、光増幅用ファイバ132に励起光を供給する励起光供給手段を構成している。利得等化器140は、光増幅用ファイバ131、132の利得帯域において、光増幅用ファイバ131、132の利得スペクトルと略同形状の損失スペクトルを有していて、利得を等化するものである。

【0052】 この光増幅モジュール1では、励起光源であるレーザダイオード

162から出力された励起光は、光カプラ112を経て光増幅用ファイバ131へ順方向に供給される。また、励起光源であるレーザダイオード163から出力された励起光は、光カプラ113を経て光増幅用ファイバ132へ逆方向に供給される。光入力端101に入力した信号光は、光カプラ111、光アイソレータ121および光カプラ112を経て光増幅用ファイバ131に入力し、この光増幅用ファイバ131において光増幅される。光増幅用ファイバ131において光増幅された信号光は、利得等化器140により波長に応じた損失を被った後、光増幅用ファイバ132に入力し、この光増幅用ファイバ132において光増幅される。光増幅用ファイバ132において光増幅された信号光は、光カプラ113、光アイソレータ122および光カプラ114を経て光出力端102より出力される。また、光入力端101に入力した信号光は、その一部が光カプラ111により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード151によりモニタされる。光出力端102より出力される信号光は、その一部が光カプラ114により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード154によりモニタされる。

【0053】 この光増幅モジュール1の全体の利得スペクトルは、光増幅用ファイバ131の利得スペクトル、光増幅用ファイバ132の利得スペクトル、および、利得等化器140の損失スペクトルを総合したものである。この光増幅モジュール1は、光増幅用ファイバ131、132それぞれが互いに異なる組成の蛍光性ガラスからなり、光増幅用ファイバ131、132それぞれの利得帯域が異なるから、全体として広帯域で利得を有することができる。

【0054】 図8A及び図8Bは、第1実施形態に係る光増幅モジュール1の利得スペクトルを示す図である。なお、光増幅用ファイバの線形スケールの蛍光強度はdBスケールの利得に比例するので、これらの図はdBスケールで利得スペクトルを表すものと考えてよい。ここでは、光増幅用ファイバ131が蛍光性ガラスAからなり、光増幅用ファイバ132が蛍光性ガラスCからなるものとする。また、レーザダイオード162、163から光増幅用ファイバ131、13

2へ供給される励起光の波長は800nmであるとする。蛍光性ガラスAからなる光増幅用ファイバ131の単体の利得スペクトルは、利得ピークに対し85%以上となる利得帯域が1175nm～1340nmであって、帯域幅が165nmである。これに対して、縦続接続された光増幅用ファイバ131および光増幅用ファイバ132の全体の利得スペクトルは、利得ピークに対し85%以上となる利得帯域が1180nm～1420nmであって、帯域幅が240nmに拡大される。しかも、その利得帯域の拡大は、短波長側では無く、光伝送路として用いられる光ファイバの損失がより低いEバンドに70nm程度拡大されるので、信号光伝送へ応用する上で好適である。

【0055】 また、雑音特性の観点からは、前段にある光増幅用ファイバ131は、後段にある光増幅用ファイバ132より、利得が高いのが好適である。そこで、前段の光増幅用ファイバ131が比較的高利得の蛍光性ガラスAからなり、後段の光増幅用ファイバ132が比較的低利得の蛍光性ガラスCからなるのが好適である。

【0056】 なお、第1実施形態に係る光増幅モジュール1で、光増幅用ファイバ131、132へ励起光を供給するレーザダイオード162、163は、入手し易い出力波長800nmのものであってもよいし、また、Bi蛍光性ガラスに特有の吸収ピークが存在する500nm帯または700nm帯のレーザ光を出力するものであってもよい。

【0057】 図9は、第2実施形態に係る光増幅モジュール2の構成図である。この図に示される光増幅モジュール2は、光入力端201側の光分波器280と、光出力端202側の光合波器290との間に、2つの信号光伝搬経路を並列に有している。光増幅モジュール2は、光分波器280から光合波器290へ向かう第1信号光伝搬経路上に順に、光カプラ211<sub>1</sub>、光アイソレータ221<sub>1</sub>、光カプラ212<sub>1</sub>、光増幅用ファイバ230<sub>1</sub>、光アイソレータ222<sub>1</sub>および光カプラ213<sub>1</sub>を備える。光増幅モジュール2は、光分波器280から光合波器29

0へ向かう第2信号光伝搬経路上に順に、光カプラ $211_2$ 、光アイソレータ $221_2$ 、光カプラ $212_2$ 、光増幅用ファイバ $230_2$ 、光アイソレータ $222_2$ および光カプラ $213_2$ を備える。また、光増幅モジュール2は、光カプラ $211_1$ に接続されたフォトダイオード $251_1$ 、光カプラ $212_1$ に接続されたレーザダイオード $262_1$ 、光カプラ $213_1$ に接続されたフォトダイオード $253_1$ 、光カプラ $211_2$ に接続されたフォトダイオード $251_2$ 、光カプラ $212_2$ に接続されたレーザダイオード $262_2$ 、および、光カプラ $213_2$ に接続されたフォトダイオード $253_2$ を備える。

**【0058】** 光分波器 $280$ は、光入力端 $201$ に入力した信号光を第1波長域と第2波長域とに分波して、第1波長域の信号光を第1信号光伝搬経路上の光カプラ $211_1$ へ出力し、第2波長域の信号光を第2信号光伝搬経路上の光カプラ $211_2$ へ出力する。光合波器 $290$ は、第1信号光伝搬経路上の光カプラ $213_1$ より到達した第1波長域の信号光を入力するとともに、第2信号光伝搬経路上の光カプラ $213_2$ より到達した第2波長域の信号光を入力して、これらを合波して光出力端 $202$ より出力させる。第2実施形態に係る光モジュール2に含まれる他の構成要素は、第1実施形態に係る光モジュール1に含まれる同一名称の構成要素と同様の機能を有する。光増幅用ファイバ $230_1$ 、 $230_2$ それぞれは、上述した何れかの蛍光性ガラスからなり、励起光および信号光を導波し得るとともに、励起光が供給されることにより信号光を光増幅し得る。また、光増幅用ファイバ $230_1$ 、 $230_2$ は、互いに組成が異なり、光分波器 $280$ と光合波器 $290$ との間に光学的に並列接続されている。そして、光増幅用ファイバ $230_1$ の利得は第1波長域で大きく、光増幅用ファイバ $230_2$ の利得は第2波長域で大きい。

**【0059】** この光増幅モジュール2では、励起光源であるレーザダイオード $262_1$ から出力された励起光は、光カプラ $212_1$ を経て光増幅用ファイバ $230_1$ へ順方向に供給される。また、励起光源であるレーザダイオード $262_2$ から

出力された励起光は、光カプラ $212_2$ を経て光増幅用ファイバ $230_2$ へ順方向に供給される。光入力端 $201$ に入力した信号光は、光分波器 $280$ により第1波長域と第2波長域とに分波され、第1波長域の信号光は第1信号光経路上の光カプラ $211_1$ へ出力され、第2波長域の信号光は第2信号光経路上の光カプラ $211_2$ へ出力される。

【0060】 光分波器 $280$ から第1信号光経路上の光カプラ $211_1$ へ出力された第1波長域の信号光は、光カプラ $211_1$ 、光アイソレータ $221_1$ および光カプラ $212_1$ を経た後、光増幅用ファイバ $230_1$ において光増幅され、更に光アイソレータ $222_1$ および光カプラ $213_1$ を経て、光合波器 $290$ へ到達する。光分波器 $280$ から第2信号光経路上の光カプラ $211_2$ へ出力された第2波長域の信号光は、光カプラ $211_2$ 、光アイソレータ $221_2$ および光カプラ $212_2$ を経た後、光増幅用ファイバ $230_2$ において光増幅され、更に光アイソレータ $222_2$ および光カプラ $213_2$ を経て、光合波器 $290$ へ到達する。そして、第1信号光伝搬経路上の光カプラ $213_1$ より光合波器 $290$ に到達した第1波長域の信号光と、第2信号光伝搬経路上の光カプラ $213_2$ より光合波器 $290$ に到達した第2波長域の信号光とは、光合波器 $290$ により合波されて光出力端 $202$ より出力される。

【0061】 また、光入力端 $201$ に入力した第1波長域の信号光は、その一部が光カプラ $211_1$ により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード $251_1$ によりモニタされる。光入力端 $201$ に入力した第2波長域の信号光は、その一部が光カプラ $211_2$ により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード $251_2$ によりモニタされる。光出力端 $202$ より出力される第1波長域の信号光は、その一部が光カプラ $213_1$ により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード $253_1$ によりモニタされる。光出力端 $202$ より出力される第2波長域の信号光は、その一部が光カプラ $213_2$ により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード $253_2$ によりモニタされる。

【0062】 この光増幅モジュール2の全体の利得スペクトルは、第1波長域では光増幅用ファイバ230<sub>1</sub>の利得スペクトルと同様であり、第2波長域では光増幅用ファイバ230<sub>2</sub>の利得スペクトルと同様である。この光増幅モジュール2は、光増幅用ファイバ230<sub>1</sub>、230<sub>2</sub>それぞれが互いに異なる組成の蛍光性ガラスからなり、光増幅用ファイバ230<sub>1</sub>、230<sub>2</sub>それぞれの利得帯域が異なるから、全体として広帯域で利得を有することができる。

【0063】 例えば、光増幅用ファイバ230<sub>1</sub>は波長1.24μm付近に蛍光ピークを有する蛍光性ガラスAからなり、光増幅用ファイバ230<sub>2</sub>は波長1.41μm付近に蛍光ピークを有する蛍光性ガラスCからなるものとする。また、光分波器280は、波長1.24μmを含む第1波長域と、波長1.41μmを含む第2波長域とに、信号光を分波するものとする。光合波器290は、上記のような第1波長域と第2波長域とを合波するものとする。この場合、この光増幅モジュール2は、上述した第1実施形態に係る光増幅モジュール1と同程度の広帯域の利得スペクトルを有することができる。

【0064】 図10は、第3実施形態に係る光増幅モジュール3の構成図である。この図に示される光増幅モジュール3は、光入力端301側の光分波手段（光分波器381～383）と、光出力端302側の光合波手段（光合波器391～393）との間に、4つの信号光伝搬経路を並列に有している。

【0065】 光増幅モジュール3は、光分波器382から光合波器392へ向かう第1信号光伝搬経路上に順に、光カプラ311<sub>1</sub>、光アイソレータ321<sub>1</sub>、光カプラ312<sub>1</sub>、光増幅用ファイバ331<sub>1</sub>、332<sub>1</sub>、利得等化器340<sub>1</sub>、光アイソレータ322<sub>1</sub>および光カプラ313<sub>1</sub>を備える。光増幅モジュール3は、光分波器382から光合波器392へ向かう第2信号光伝搬経路上に順に、光カプラ311<sub>2</sub>、光アイソレータ321<sub>2</sub>、光カプラ312<sub>2</sub>、光増幅用ファイバ330<sub>2</sub>、利得等化器340<sub>2</sub>、光アイソレータ322<sub>2</sub>および光カプラ313<sub>2</sub>を備える。光増幅モジュール3は、光分波器383から光合波器393へ向かう第3

信号光伝搬経路上に順に、光カプラ 311<sub>3</sub>、光アイソレータ 321<sub>3</sub>、光カプラ 312<sub>3</sub>、光増幅用ファイバ 330<sub>3</sub>、利得等化器 340<sub>3</sub>、光アイソレータ 322<sub>3</sub>および光カプラ 313<sub>3</sub>を備える。光増幅モジュール 3 は、光分波器 383 から光合波器 393 へ向かう第 4 信号光伝搬経路上に順に、光カプラ 311<sub>4</sub>、光アイソレータ 321<sub>4</sub>、光カプラ 312<sub>4</sub>、光増幅用ファイバ 330<sub>4</sub>、利得等化器 340<sub>4</sub>、光アイソレータ 322<sub>4</sub>および光カプラ 313<sub>4</sub>を備える。

【0066】 また、光増幅モジュール 2 は、光カプラ 311<sub>1</sub>に接続されたフォトダイオード 351<sub>1</sub>、光カプラ 312<sub>1</sub>に接続されたレーザダイオード 362<sub>1</sub>、光カプラ 313<sub>1</sub>に接続されたフォトダイオード 353<sub>1</sub>、光カプラ 311<sub>2</sub>に接続されたフォトダイオード 351<sub>2</sub>、光カプラ 312<sub>2</sub>に接続されたレーザダイオード 362<sub>2</sub>、光カプラ 313<sub>2</sub>に接続されたフォトダイオード 353<sub>2</sub>、光カプラ 311<sub>3</sub>に接続されたフォトダイオード 351<sub>3</sub>、光カプラ 312<sub>3</sub>に接続されたレーザダイオード 362<sub>3</sub>、光カプラ 313<sub>3</sub>に接続されたフォトダイオード 353<sub>3</sub>、光カプラ 311<sub>4</sub>に接続されたフォトダイオード 351<sub>4</sub>、光カプラ 312<sub>4</sub>に接続されたレーザダイオード 362<sub>4</sub>、および、光カプラ 313<sub>4</sub>に接続されたフォトダイオード 353<sub>4</sub>を備える。

【0067】 光分波器 381 は、光入力端 301 に入力した信号光を 2 つの波長域に分波して、一方の波長域の信号光を光分波器 382 へ出力し、他方の波長域の信号光を光分波器 383 へ出力する。光分波器 382 は、光分波器 381 より到達した信号光を第 1 波長域と第 2 波長域とに分波して、第 1 波長域の信号光を第 1 信号光伝搬経路上の光カプラ 311<sub>1</sub>へ出力し、第 2 波長域の信号光を第 2 信号光伝搬経路上の光カプラ 311<sub>2</sub>へ出力する。光分波器 383 は、光分波器 381 より到達した信号光を第 3 波長域と第 4 波長域とに分波して、第 3 波長域の信号光を第 3 信号光伝搬経路上の光カプラ 311<sub>3</sub>へ出力し、第 4 波長域の信号光を第 4 信号光伝搬経路上の光カプラ 311<sub>4</sub>へ出力する。すなわち、光分波器 381～383 からなる光分波手段は、光入力端 301 に入力した信号光を

4つの波長域に分波する。

【0068】 光合波器392は、第1信号光伝搬経路上の光カプラ313<sub>1</sub>より到達した第1波長域の信号光を入力するとともに、第2信号光伝搬経路上の光カプラ313<sub>2</sub>より到達した第2波長域の信号光を入力して、これらを合波して光合波器391へ出力する。光合波器393は、第3信号光伝搬経路上の光カプラ313<sub>3</sub>より到達した第3波長域の信号光を入力するとともに、第4信号光伝搬経路上の光カプラ313<sub>4</sub>より到達した第4波長域の信号光を入力して、これらを合波して光合波器391へ出力する。光合波器391は、光合波器392より到達した第1波長域および第2波長域の信号光を入力するとともに、光合波器393より到達した第3波長域および第4波長域の信号光を入力して、これら4つの波長域の信号光を合波して出力端302より出力させる。

【0069】 第3実施形態に係る光モジュール3に含まれる他の構成要素は、第1実施形態に係る光モジュール1に含まれる同一名称の構成要素と同様の機能を有する。光増幅用ファイバ331<sub>1</sub>, 332<sub>1</sub>それぞれは、上述した何れかの蛍光性ガラスからなり、励起光および信号光を導波し得るとともに、励起光が供給されることにより信号光を光増幅し得る。また、光増幅用ファイバ331<sub>1</sub>, 332<sub>1</sub>は、互いに組成が異なり、第1信号光伝搬経路上に光学的に継続接続されている。

【0070】 光増幅用ファイバ330<sub>2</sub>～330<sub>4</sub>それぞれも、蛍光性ガラスからなり、励起光および信号光を導波し得るとともに、励起光が供給されることにより信号光を光増幅し得る。そして、光増幅用ファイバ331<sub>1</sub>, 332<sub>1</sub>の利得は第1波長域で大きく、光増幅用ファイバ330<sub>2</sub>の利得は第2波長域で大きく、光増幅用ファイバ330<sub>3</sub>の利得は第3波長域で大きく、光増幅用ファイバ330<sub>4</sub>の利得は第4波長域で大きい。

【0071】 この光増幅モジュール3では、励起光源であるレーザダイオード362<sub>1</sub>から出力された励起光は、光カプラ312<sub>1</sub>を経て光増幅用ファイバ33

1<sub>1</sub>, 332<sub>1</sub>へ順方向に供給される。励起光源であるレーザダイオード362<sub>2</sub>から出力された励起光は、光カプラ312<sub>2</sub>を経て光増幅用ファイバ330<sub>2</sub>へ順方向に供給される。励起光源であるレーザダイオード362<sub>3</sub>から出力された励起光は、光カプラ312<sub>3</sub>を経て光増幅用ファイバ330<sub>3</sub>へ順方向に供給される。  
5 また、励起光源であるレーザダイオード362<sub>4</sub>から出力された励起光は、光カプラ312<sub>4</sub>を経て光増幅用ファイバ330<sub>4</sub>へ順方向に供給される。

【0072】 光入力端301に入力した信号光は、光分波器381～383により、第1波長域～第4波長域に分波され、第1波長域の信号光は第1信号光経路上の光カプラ311<sub>1</sub>へ出力され、第2波長域の信号光は第2信号光経路上の光カプラ311<sub>2</sub>へ出力され、第3波長域の信号光は第3信号光経路上の光カプラ311<sub>3</sub>へ出力され、第4波長域の信号光は第4信号光経路上の光カプラ311<sub>4</sub>へ出力される。  
10

【0073】 光分波器382から第1信号光経路上の光カプラ311<sub>1</sub>へ出力された第1波長域の信号光は、光カプラ311<sub>1</sub>、光アイソレータ321<sub>1</sub>および光カプラ312<sub>1</sub>を経た後、光増幅用ファイバ331<sub>1</sub>, 332<sub>1</sub>において光増幅され、利得等化器340<sub>1</sub>により利得等化され、更に光アイソレータ322<sub>1</sub>および光カプラ313<sub>1</sub>を経て、光合波器392へ到達する。光分波器382から第2信号光経路上の光カプラ311<sub>2</sub>へ出力された第2波長域の信号光は、光カプラ311<sub>2</sub>、光アイソレータ321<sub>2</sub>および光カプラ312<sub>2</sub>を経た後、光増幅用ファイバ330<sub>2</sub>において光増幅され、利得等化器340<sub>2</sub>により利得等化され、更に光アイソレータ322<sub>2</sub>および光カプラ313<sub>2</sub>を経て、光合波器392へ到達する。  
15  
20

【0074】 光分波器383から第3信号光経路上の光カプラ311<sub>3</sub>へ出力された第3波長域の信号光は、光カプラ311<sub>3</sub>、光アイソレータ321<sub>3</sub>および光カプラ312<sub>3</sub>を経た後、光増幅用ファイバ330<sub>3</sub>において光増幅され、利得等化器340<sub>3</sub>により利得等化され、更に光アイソレータ322<sub>3</sub>および光カプラ

313<sub>3</sub>を経て、光合波器393へ到達する。光分波器383から第4信号光経路上の光カプラ311<sub>4</sub>へ出力された第4波長域の信号光は、光カプラ311<sub>4</sub>、光アイソレータ321<sub>4</sub>および光カプラ312<sub>4</sub>を経た後、光増幅用ファイバ330<sub>4</sub>において光増幅され、利得等化器340<sub>4</sub>により利得等化され、更に光アイソレータ322<sub>4</sub>および光カプラ313<sub>4</sub>を経て、光合波器393へ到達する。

【0075】 そして、第1信号光伝搬経路上の光カプラ313<sub>1</sub>より光合波器392に到達した第1波長域の信号光と、第2信号光伝搬経路上の光カプラ313<sub>2</sub>より光合波器392に到達した第2波長域の信号光と、第3信号光伝搬経路上の光カプラ313<sub>3</sub>より光合波器393に到達した第3波長域の信号光と、第4信号光伝搬経路上の光カプラ313<sub>4</sub>より光合波器393に到達した第4波長域の信号光とは、光合波器391～393により合波されて光出力端302より出力される。

【0076】 また、光入力端301に入力した第1波長域の信号光は、その一部が光カプラ311<sub>1</sub>により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード351<sub>1</sub>によりモニタされる。光入力端301に入力した第2波長域の信号光は、その一部が光カプラ311<sub>2</sub>により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード351<sub>2</sub>によりモニタされる。光入力端301に入力した第3波長域の信号光は、その一部が光カプラ311<sub>3</sub>により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード351<sub>3</sub>によりモニタされる。光入力端301に入力した第4波長域の信号光は、その一部が光カプラ311<sub>4</sub>により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード351<sub>4</sub>によりモニタされる。

【0077】 また、光出力端302より出力される第1波長域の信号光は、その一部が光カプラ313<sub>1</sub>により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード353<sub>1</sub>によりモニタされる。光出力端302より出力される第2波長域の信号光は、その一部が光カプラ313<sub>2</sub>により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード353<sub>2</sub>によりモニタされる。光出力端302より出力される第3波長域の

信号光は、その一部が光カプラ $3\ 1\ 3_3$ により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード $3\ 5\ 3_3$ によりモニタされる。光出力端 $3\ 0\ 2$ より出力される第4波長域の信号光は、その一部が光カプラ $3\ 1\ 3_4$ により分岐されて、そのパワーがフォトダイオード $3\ 5\ 3_4$ によりモニタされる。

5 【0078】 この光増幅モジュール3の全体の利得スペクトルは、第1波長域では光増幅用ファイバ $3\ 3\ 1_1, 3\ 3\ 2_1$ の利得スペクトルと利得等化器 $3\ 4\ 0_1$ の損失スペクトルとを総合したものであり、第2波長域では光増幅用ファイバ $3\ 3\ 0_2$ の利得スペクトルと利得等化器 $3\ 4\ 0_2$ の損失スペクトルとを総合したものであり、第3波長域では光増幅用ファイバ $3\ 3\ 0_3$ の利得スペクトルと利得等化器 $3\ 4\ 0_3$ の損失スペクトルとを総合したものであり、第4波長域では光増幅用ファイバ $3\ 3\ 0_4$ の利得スペクトルと利得等化器 $3\ 4\ 0_4$ の損失スペクトルとを総合したものである。

10 【0079】 この光増幅モジュール4は、光増幅用ファイバ $3\ 3\ 1_1, 3\ 3\ 2_1, 3\ 3\ 0_2, 3\ 3\ 0_3$ および $3\ 3\ 0_4$ それぞれが互いに異なる組成の蛍光性ガラスからなり、各々の利得帯域が異なるから、全体として広帯域で利得を有することができる。例えば、光増幅用ファイバ $3\ 3\ 1_1$ は波長 $1.24\ \mu m$ 付近に蛍光ピークを有する蛍光性ガラスAからなり、光増幅用ファイバ $3\ 3\ 2_1$ は波長 $1.41\ \mu m$ 付近に蛍光ピークを有する蛍光性ガラスCからなり、この場合、光増幅用ファイバ $3\ 3\ 1_1, 3\ 3\ 2_1$ は、レーザダイオード $3\ 6\ 2_1$ より波長 $0.8\ \mu m$ 帯の励起光が供給されることにより、第1波長域としてOバンドおよびEバンドの信号光を光増幅することができる。光増幅用ファイバ $3\ 3\ 0_2$ は、Tm元素が添加された蛍光性ガラスからなり、レーザダイオード $3\ 6\ 2_2$ より波長 $1.05\ \mu m$ 帯の励起光が供給されることにより、第2波長域としてSバンドの信号光を光増幅することができる。光増幅用ファイバ $3\ 3\ 0_3$ は、Er元素が添加された蛍光性ガラスからなり、レーザダイオード $3\ 6\ 2_3$ より波長 $1.48\ \mu m$ 帯の励起光が供給されることにより、第3波長域としてCバンドの信号光を光増幅すること

5 ができる。また、光増幅用ファイバ<sub>3304</sub>は、Er元素が添加された蛍光性ガラスからなり、レーザダイオード<sub>3624</sub>より波長<sub>1.48 μm</sub>帯の励起光が供給されることにより、第4波長域としてLバンドの信号光を光増幅することができる。この場合、この光増幅モジュール3は、O, E, S, CおよびLの各バンドに亘る広帯域（全帯域幅が<sub>310 nm</sub>程度）の利得スペクトルを有することができる。

10 【0080】 本発明は、上記実施形態に限定されるものではなく、種々の変形が可能である。例えば、上記の各実施形態の光増幅モジュールでは、光増幅媒体として光増幅用ファイバを有するものであったが、平面基板上に形成された蛍光性ガラスからなる光導波路であってもよい。ただし、光増幅用ファイバは、光増幅作用長を長くすることが容易である点や、他のファイバや他の光学部品（例えば光アイソレータや光カプラなど）と接続する際の損失が小さい点で、平面光導波路と比較して好ましい。

15 【0081】 また、光通信システムの光伝送路の分散を補償するための分散補償器を光増幅モジュールが備えているのも好適である。例えば、第1実施形態に係る光増幅モジュール1において、光増幅用ファイバ<sub>131</sub>と光増幅用ファイバ<sub>132</sub>との間に分散調整器が設けられるのが好適であり、第3実施形態に係る光増幅モジュール3において、光増幅用ファイバ<sub>331</sub>と光増幅用ファイバ<sub>332</sub>との間に分散調整器が設けられるのが好適である。また、第2実施形態に係る光増幅モジュール2において、光増幅用ファイバ<sub>2301</sub>を多段構成として、その段間に第1波長域で分散補償する分散調整器が設けられるのが好適であり、光増幅用ファイバ<sub>2302</sub>を多段構成として、その段間に第2波長域で分散補償する分散調整器が設けられるのが好適である。第3実施形態に係る光増幅モジュール3においても同様である。

20 25 【0082】 また、上記実施形態では、添加物としてBiイオンを含有する蛍光性ガラスについて説明したが、本発明は蛍光性結晶または蛍光性ガラスセラミ

ックスにも適用することができる。すなわち、本発明に係る蛍光性結晶または蛍光性ガラスセラミックスは、添加物としてBiイオンを含有する領域にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>以外の共添加物を含有するものである。これらは、上記の蛍光性ガラスより強い蛍光を得ることができる。

- 5 【0083】 本発明に係る蛍光性ガラスは、ガラス構成成分としてSiO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub>およびP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>のうち少なくとも1種類の酸化物を50mol%以上含み、添加物としてBiイオンを含有しており、100nmを超える広帯域で蛍光性を有し、融点が低いことから製造が容易である。

10

請求の範囲

1. 添加物としてBiイオンを含有する領域のガラス構成成分としてSiO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub>およびP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>のうち少なくとも1種類の酸化物を50mol%以上含むことと特徴とする蛍光性ガラス。
- 5 2. ガラス構成成分としてBaO, CaO, Na<sub>2</sub>O, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>およびNb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>のうち少なくとも1種類の酸化物を含むことを特徴とする請求項1記載の蛍光性ガラス。
3. 共添加物として3価の正イオンとなる元素の酸化物を含有することを特徴とする請求項2記載の蛍光性ガラス。
- 10 4. 共添加物としてAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含有することを特徴とする請求項3記載の蛍光性ガラス。
5. 共添加物として含有されるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の濃度が5mol%以上であることを特徴とする請求項4記載の蛍光性ガラス。
- 15 6. 共添加物としてAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含有すること無くB<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含有することを特徴とする請求項2記載の蛍光性ガラス。
7. 共添加物としてTa<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を含有することを特徴とする請求項6記載の蛍光性ガラス。
8. 蛍光のピーク波長が1300nmを超えることを特徴とする請求項1記載の蛍光性ガラス。
- 20 9. 蛍光のピーク波長が1400nmを超えることを特徴とする請求項1記載の蛍光性ガラス。
10. 塩基度の指標であるB値が0.3以下であることを特徴とする請求項1記載の蛍光性ガラス。
11. 共添加物として3価の正イオンとなる元素の酸化物を含有することを特徴とする請求項10記載の蛍光性ガラス。
- 25 12. 添加物としてBiイオンを含有する領域にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>以外の共添加物を含

有することを特徴とする蛍光性結晶。

13. 添加物としてB<sub>i</sub>イオンを含有する領域にAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>以外の共添加物を含有することを特徴とする蛍光性ガラスセラミックス。

14. 請求項1記載の蛍光性ガラスからなり、励起光および信号光を導波し得るとともに、前記励起光が供給されることにより前記信号光を光増幅し得ることを特徴とする光増幅用導波路。

15. 請求項14記載の光増幅用導波路と、

前記増幅用導波路に励起光を供給する励起光供給手段と  
を備えることを特徴とする光増幅モジュール。

16. 前記励起光の中心波長が800nmより長いことを特徴とする請求項15記載の光増幅モジュール。

17. 請求項14記載の光増幅用導波路であって互いに組成が異なり信号光伝搬経路上に継続接続された第1光増幅用導波路および第2光増幅用導波路と、  
前記第1光増幅用導波路に励起光を供給する第1励起光供給手段と、

前記第2光増幅用導波路に励起光を供給する第2励起光供給手段と  
を備えることを特徴とする光増幅モジュール。

18. 前記第1光増幅用導波路がAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含有し、

前記第2光増幅用導波路がAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>以外の共添加物を含有し、

前記第1光増幅用導波路および前記第2光増幅用導波路それぞれの蛍光ピーク  
波長が互いに70nm以上離れている

ことを特徴とする請求項17記載の光増幅モジュール。

19. 請求項14記載の光増幅用導波路であって互いに組成が異なる第1光增  
幅用導波路および第2光増幅用導波路と、

前記第1光増幅用導波路に励起光を供給する第1励起光供給手段と、

前記第2光増幅用導波路に励起光を供給する第2励起光供給手段と、

入力した信号光を第1波長域と第2波長域とに分波して、前記第1波長域の信

号光を前記第1光増幅用導波路へ出力し、前記第2波長域の信号光を前記第2光増幅用導波路へ出力する光分波手段と、

前記第1光増幅用導波路により光増幅されて出力された前記第1波長域の信号光と、前記第2光増幅用導波路により光増幅されて出力された前記第1波長域の  
5 信号光とを入力して、これらを合波して出力する光合波手段と

を備えることを特徴とする光増幅モジュール。

## 要約

本発明は、添加物としてBiイオンを含有する領域のガラス構成成分としてSiO<sub>2</sub>, GeO<sub>2</sub>およびP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>のうち少なくとも1種類の酸化物を50mol%以上含むことを特徴とする蛍光性ガラスを提供する。